

구형과 브러시리스 직류 전동기의 고속 운전 제어 알고리즘 개발에 관한 연구

최재혁, 장 훈, 김종선, 유지윤, 송명현*, 이용순**
고려대학교, 국립순천대학교*, 삼성전자**

A Study on the Development of High-Speed Control Algorithm for the trapezoidal Brushless DC Motor

Jae-Hyuk Choi, Hoon Jang, Jong-Sun Kim, Ji-Yoon Yoo,
Myung-Hyun Song, Young-Sun Lee

Korea University, Sunchon National University, Samsung Electronics Co.

ABSTRACT

The Objects of this paper are developing and also improving a high-speed driving system of brushless DC motor(BLDCM) with economical and practical performance. Because BLDC motors are manufactured that each motor can create proper torque for their individual purpose, it is difficult to increase over the rated speed when a motor speed (with it's rated road) is reaching to a maximum speed so the motor torque cannot be increased. This paper verifies the effects of Leading Angle Algorithm, that is proposed on this paper, with examining existing methods to maximize the torque of a motor in high-speed driving area. The arithmetic processor for this experiment is TMS320C240 DSP controller that is designed for a special purpose of motor control in Taxis Instrument Inc., and the used inverter is PM10CSJ060, a Intelligent Power Module of Mitsubishi Corporation.

1. 서 론

구형과 브러시리스 직류전동기는 회전자에 권선을 감는 대신 영구 자석을 장착하여 일반적인 DC 모터에 비해 관성 대 토크 비율이 높으며 브러시가 없으므로 유지, 보수가 용이하고 브러시와 정류자편의 마찰에 의해 발생하는 스파크나 가청 잡음이 없어 사용환경에 제약을 받지 않는다는 장점이 있다.^[1] 회전자에 흐르는 자화 전류에 의해 동손이 발생하고 이로 인해 효율이 떨어지며 슬립특성에 의해서 광범위한 속도 제어가 어려운 유도 전동기에 비하여 구형과 브러시리스 직류 전동기는 회전자가

영구자석으로 되어 있어 동손이 없으므로 효율이 높고 토크 대 속도 특성이 선형적이며 광범위한 속도 제어가 가능하다. 따라서 대부분의 사무 자동화 용 기기 및 가전기기, 공장 자동화 기기 등에 널리 이용되고 있다.^[2]

그러나 한정된 직류 링크 전압을 갖는 인버터에 의해 구동되어지는 구형과 브러시리스 직류 전동기는 사용 용도에 따라 적절한 크기의 토크를 낼 수 있게 설계되었기 때문에 정격 부하를 인가한 상태에서 전동기의 회전속도가 최대 속도에 이르면 전동기가 낼 수 있는 토크가 더 이상 증가할 수 없는 상태가 되어 최대속도 이상의 속도로 가속하기 어렵게 된다.^[2]

본 논문에서는 이와같이 전동기가 고속영역에서 구동되는 경우 발생하는 토크 감소의 원인을 분석하고, 진각제어를 통해 구형과 브러시리스 직류 전동기의 약계자 영역에서 구동시키는 방법을 제안하며 제안한 방법을 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 효용성을 검증한다.

2. 본 론

2.1 고속운전시의 문제점

전동기가 고속영역에서 운전을 하게 되면 주파수의 증가로 인해 유도성 리액턴스 성분이 커지게 되고 이로 인해서 전동기의 전기적 시정수는 커지게 된다.^[1] 그 결과 저속 영역에서와 달리 전류가 흘러야 하는 120° 구간 중에 초기에 전류가 0에서부터 필요로 하는 전류값 I_{ref} 까지 기립하는데 걸리는 시간이 증가하게 되어 60° 구간에 가서야 전동기가 필요로 하는 전류값을 얻을 수 있게된다. 이로 인해 120° 통전 구간에서의 평균 전류값이 작아져 전동기의 출력 토크가 작아진다.^[3] 또한 120° 구간 이후에도 해당상의 전류가 바로 0으로 소호되지 않아

전류 파형과 역기전력 파형간에 위상차를 발생시는데 이것은 전동기의 출력 토크를 감소시키는 또 다른 요인이 된다. 특히 앞서 설명한 바와 같이 전동기의 회전속도가 베이스 속도에 접근하게 되면 인버터에 인가되는 전압의 크기와 역기전력의 크기가 비슷해져서 통전 시켜주어야 하는 전류를 해당 상의 권선에 흘려주기가 더욱 어려워진다.^[4] 그림 1은 고속영역에서 전동기가 구동될 경우의 상전류와 역기전력 파형을 나타내고 있다.

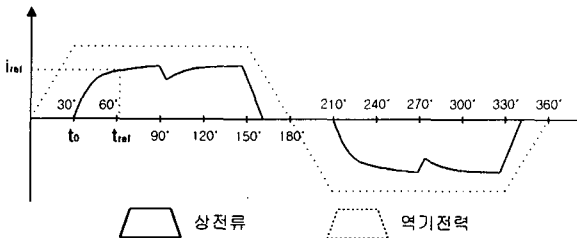


그림 1 고속영역에서의 상전류 및 역기전력 파형
Fig. 1 Phase current and emf waveform in the high-speed region

2.2 진각제어를 통한 전동기의 고속운전

본 논문에서는 해당상의 전류를 흘려주기 시작해야 되는 시점에 이르기 전에 미리 인버터의 해당상의 스위치를 빨리 턴온 시킴으로써 구형과 브러시리스 직류전동기의 약계자 영역에서의 운전을 구현한다.^[4] 그림 2에서 볼 수 있듯이 진각제어 기법을 구형과 브러시리스 직류전동기에 적용시킴으로써 해당상의 스위치를 빨리 턴온 시켜주는 t_a 부터 구형과 전동기의 구동원리에 의해서 이론상 스위치의 턴온 시점간 t_0 까지의 구간에서는 역기전력의 크기가 비교적 작으므로 이로 인해 전류의 기립이 빨라지게 된다.

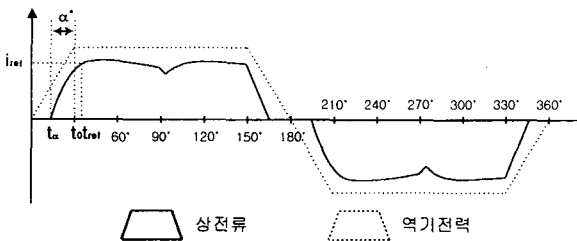


그림 2 α° 만큼 진각을 하였을 경우의 상전류 및 역기전력 파형
Fig. 2 Phase current and emf waveform when leading commutation point by α°

그림 3은 진각제어를 수행하였을 경우 전동기의 속도 대 토크 특성을 나타내고 있다. 진각제어를 수행함으로써 시작하는 시점부터 속도 대 토크 특성을 나타내는 직선의 기울기가 변화하게 되어 아

래 그림과 같이 약계자 운전 영역이 확장됨을 알 수 있다. 이와 같은 진각제어에 의한 속도 대 토크 특성의 변화는 전동기가 고속운전에서 출력할 수 있는 최대 토크값을 증가시키게 된다.

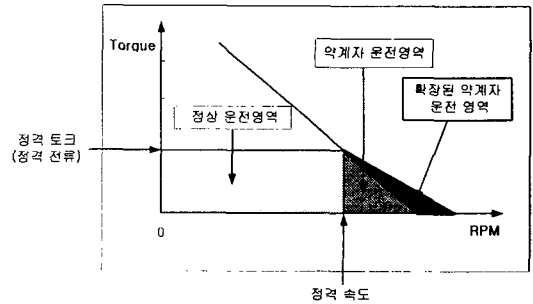


그림 3 진각제어를 하였을 경우의 속도 대 토크 그래프
Fig. 3 Graph of speed vs torque making a leading angle commutation

2.3 진각제어 알고리즘의 구현

그림 4는 진각제어를 하여 고속운전을 구현한 소프트웨어의 흐름도이다. 흐름도는 크게 주제어 루틴, 홀센서 신호를 처리하는 CAP4 루틴, 그리고 엔코더 신호를 기준으로 상전류 전환을 시켜주는 타이머 3 PER 인터럽트 루틴으로 구성된다.

진각 제어를 하기 위해서 필요한 기능들로는 첫째 홀센서 신호를 검출하여 회전자 위치정보를 얻어야하고 둘째 홀센서에 의해서 검출된 회전자 위치를 기준으로 원하는 만큼의 상전류 전환시점을 찾기 위해서 상전류 전환 시점을 더욱 세분할 수 있는 기능이 필요하다. 그리고 마지막 세 번째로 속도제어를 수행하기 위하여 전동기의 속도를 계산하는 기능이 필요하게 된다.

본 논문에서는 홀센서 신호를 배타적 논리합 시키고 이를 인터럽트 CAP4의 소스로 제공하는 방법으로 회전자 위치를 검출하게 되고, 상전류 전환시점들 사이마다 222개의 펄스를 갖는 엔코더 신호의 배타적 논리합 신호를 타이머 3의 클럭으로 제공함으로써 상전류 전환시점을 더욱 세분화할 수 있게 하였다. 그리고 10Mhz의 오실레이터 출력을 타이머 2에 입력하여 홀센서 트리거 시점마다 타이머 2의 값을 읽어서 속도를 계산하게 된다. 주제어 루틴에서는 홀센서 신호를 읽어서 전동기를 기동시키고 전동기가 회전해서 3상 홀센서 신호의 트리거 시점을 기다린다. 홀센서의 트리거 신호에 의해 CAP4 인터럽트 루틴이 수행되고 다시 리턴 되어 온 후에는 타이머 3에 의해 엔코더 펄스를 세기 시작한 값이 일정 값이 되기를 기다린다. 그리고 엔코더 펄스가 특정 값이 되면 타이머 3 인터럽트가 발생되고 타이머 3 인터럽트 루틴이 수행된 이후에

는 다시 새로운 홀센서 신호의 트리거 시점을 기다리는 과정을 반복하게 된다. 그리고 계산된 속도와 지령 속도와 차이를 계산하여 PI제어를 수행하여 PWM 파형의 시비율을 계산하게 된다. 타이머 3 인터럽트 루틴에서는 홀센서 트리거 시점부터 세기 시작한 엔코더 신호의 펄스가 일정 값이 되면 상전류를 전환시키는 기능을 한다.

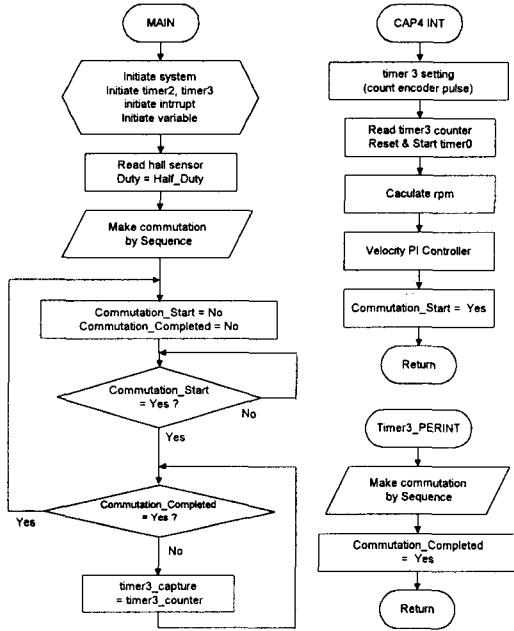


그림 4 진각 제어 흐름도
Fig. 4 Leading angle control flow chart

3. 시뮬레이션 및 실험

그림 5~7은 제안된 진각제어 기법의 타당성을 고찰하기 위해 시뮬레이션을 시행한 파형이며, 그림 8~10은 실제 시스템에서 DC link 90V, Duty 1로 설정하여 각각 10°, 20°, 30° 진각제어를 행하였을 때 상 전압 및 상 전류의 결과 파형이다. 표 2에서는 5° 간격으로 진각제어를 행하였을 때 속도, 전류, 전력 값을 나타내었다.

표 1 전동기 정격
Table. 1 Ratings of motor

상수/극수	3상/6극
입력 전압	AC 110 [V]
정격 전류	3.44 [A]
정격/최대 속도	3,000/4,500 [rpm]
정격 출력(P _{out})	300 [W]
토크상수(k _t)	0.29 [Nm/A]
관성 모멘트(J)	8.26 × 10 ⁻³ [Kgm ²]
저항(R)	1.5 [Ω]

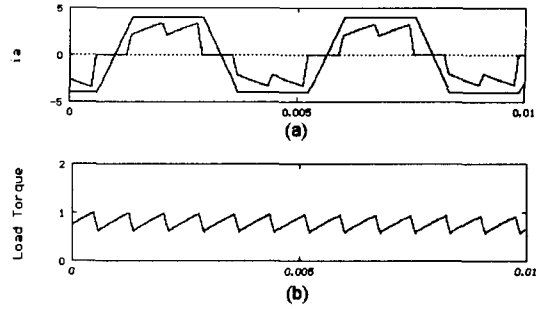


그림 5 10° 진각시의 상전류, 역기전력 및 토크파형
(a) 상전류 및 역기전력, (b) 토크
Fig. 5 Phase current, emf, and torque waveform when making leading angle control by 10° (a) phase current and emf, (b) torque

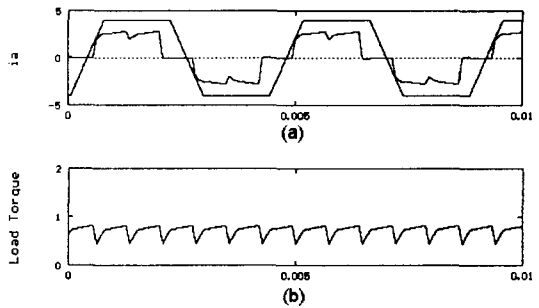


그림 6 20° 진각시의 상전류, 역기전력 및 토크파형
(a) 상전류 및 역기전력, (b) 토크
Fig. 6 Phase current, emf, and torque waveform when making leading angle control by 20° (a) phase current and emf, (b) torque

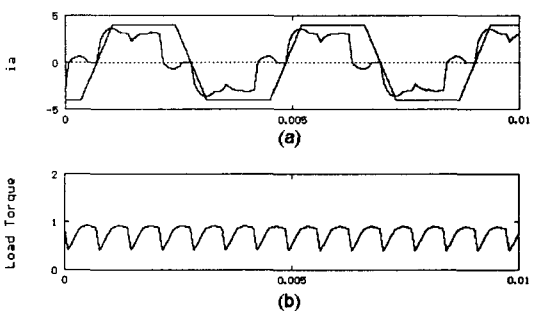


그림 7 30° 진각시의 상전류, 역기전력 및 토크파형
(a) 상전류 및 역기전력, (b) 토크
Fig. 7 Phase current, emf, and torque waveform when making leading angle control by 30° (a) phase current and emf, (b) torque

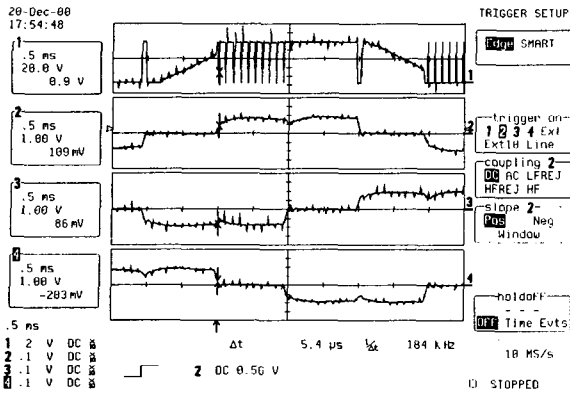


그림 8 10도 진각시 상전압 및 상전전류 파형
Fig 8 Phase current, voltage waveform when making leading angle control by 10°

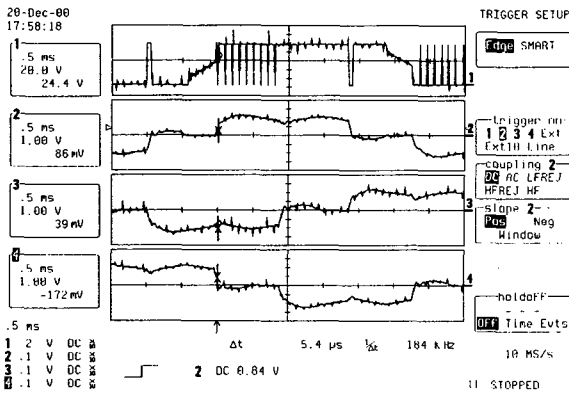


그림 9 20도 진각시 상전압 및 상전전류 파형
Fig 9 Phase current, voltage waveform when making leading angle control by 20°

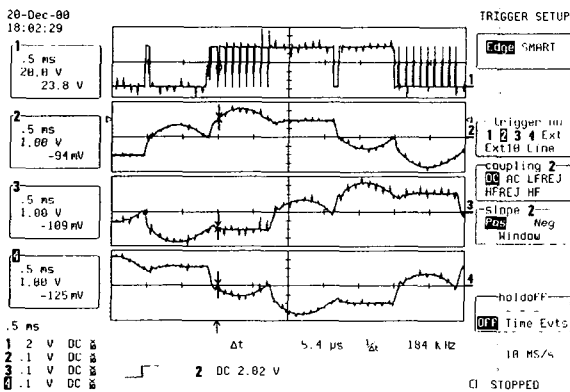


그림 10 30도 진각시 상전압 및 상전전류 파형
Fig. 10 Phase current, voltage waveform when making leading angle control by 30°

표 2 진각값에 따른 속도, 전류 및 소비전력 변화
Table 2 Table of speed, current, and power according to leading angle

진각값 (°)	속도 (rpm)	전류 (A)	전력 (W)
0	3000	2.2	102
5	3050	2.2	103
10	3205	2.25	106
15	3210	2.35	110
20	3300	2.42	114
25	3380	2.5	120
30	3512	2.65	128
35	3840	3.1	151

4. 결론

상전류 전환 시점을 변화시키면서 실험을 수행한 결과 전기각으로 30° 이상 상전류 전환을 앞당기게 되면 입력전류 및 전력값이 급증함을 확인하고 진각 최대 한계치를 전기각 30°로 하는 것이 바람직함을 확인하였다. 또한 제어기의 설계시 진각값의 최대치 설정뿐 아니라, 진각 구간에서의 전류의 오버슈트와 평균전류가 급 상승함을 고려해야 하며 이렇게 전동기를 구동시켰을 경우 주어진 인버터의 직류링크 전압으로부터 전동기를 구동시킬 수 있는 최대 속도가 15~20% 향상됨을 확인할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent- Magnet Motors, Magna Physics Pub. and Oxford Univ. Press, 1994.
- [2] R. C. Sen, "Electric Motor Drives and Control - Past, Present, and Future", IEEE Trans. on Ind. Elec., vol. 37, no. 6, pp. 562-575, Dec. 1990.
- [3] A. M. Jungreis and A. W. Kelley, "Simplified Adjustable Speed Drive for Residential Applications", Conf. Rec. of IEEE IAS, pp. 530-537, 1994.
- [4] N. Ertugul and P. Acarnly, "A New Algorithm for Sensorless Operation of Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. 30, no. 1, pp. 126- 133, Jan./Feb. 1994.
- [5] H. Watanabe, et. al., "An Improved Measuring System of Rotor Position Angles of the Sensorless Direct Drive Servomotor", Proc. of IEEE IECON, pp. 165-170, 1991.
- [6] K. Iizaka, et. al., "Microcomputer Control for Sensorless Brushless DC Motor," IEEE Trans. on Ind. Appl., vol. IA-21, no. 4, pp. 595-601, May/Jun. 1985.